

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211102001

文章编号: 1674-599X(2023)03-0010-08

引用格式: 陈瑜, 吴思华, 丁婧雯. 基于RSM的粉煤灰地聚合物注浆材料优化设计[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 10-17, 45.

Citation: CHEN Yu, WU Sihua, DING Jingwen. Optimization design of fly ash ground polymer grouting material based on RSM[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 10-17, 45.

基于RSM的粉煤灰地聚合物注浆材料优化设计

陈瑜, 吴思华, 丁婧雯

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为有效解决粉煤灰地聚合物注浆材料(FGGM)的配比优化问题, 提出了基于响应面法(RSM)对FGGM体系的试验设计。通过创建二次多项式预测模型和方差分析, 探究了矿渣含量 A 、水玻璃浓度 B 和水胶比 C 三因素的作用及其之间的交互作用对FGGM流动性和28 d抗压强度的影响规律。研究表明: 水胶比对FGGM流动性影响极其显著, 对流动性影响的强弱顺序依次为水胶比>水玻璃浓度>矿渣含量; 28 d抗压强度影响的强弱顺序为矿渣含量>水胶比>水玻璃浓度。利用RSM分析得到FGGM的最优配合比为: A 为28.8%, B 为1.37 mol/kg, C 为0.56, 其流动性与28 d抗压强度均满足注浆性能要求, 且实际值与预测值的相对误差均在合理范围内, 证明了RSM能有效优化配比, 并具有较好的预测能力。

关键词: 粉煤灰; 地聚合物; 注浆材料; 响应面法; 流动性; 强度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Optimization design of fly ash ground polymer grouting material based on RSM

CHEN Yu, WU Sihua, DING Jingwen

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To effectively solve the optimization problem of the mix design for fly ash-based polymer grouting material (FGGM), the response surface methodology was used to design the FGGM system. The effects of slag content A , sodium silicate concentration B and water-to-binder ratio C and their interaction effects on the fluidity and 28 d compressive strength of FGGM were investigated by creating quadratic polynomial prediction model and variance analysis. The results show that the ratio has the most significant effect on the fluidity of FGGM, followed by sodium silicate concentration and slag content, while slag content shows the most notable influence on the 28 d compressive strength, followed by w/b ratio and sodium silicate concentration. The results of RSM analysis indicates that, with the optimal mix proportion of $A=28.8\%$, $B=1.37$ mol/kg, and water-to-binder ratio=0.56, FGGM can provide desirable fluidity and 28 d compressive strength, complying with all the requirements for grouting materials. Moreover, the relative error between actual value and predicted value was within a reasonable range, which verifies that RSM can effectively optimize the mix design of FGGM and has accurate prediction ability.

Key words: fly ash; geopolymer; grouting material; response surface method; fluidity; strength

注浆技术已被广泛应用于裂缝、路基沉降、路面底脱空^[1]等道路的各种病害修复。目前, 硅酸

盐水泥是最常用的无机注浆材料之一, 但水泥在生产过程中大量排放的CO₂对环境有害, 亟须开发替

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51302020)

作者简介: 陈瑜(1975—), 女, 长沙理工大学教授, 博士。

代硅酸盐水泥的环保注浆材料。地聚合物是硅酸铝材料通过碱性活化形成的三维网络状无机聚合物胶凝材料,其凝结硬化后的结石体具有较好的力学性能和耐久性^[2]。地聚合物复合材料可以减少26%~45%的碳排放,这使得地聚合物成为水泥的环保替代品^[3-4],在提高经济效益的同时也降低了对环境的影响。

对于地聚合物注浆材料而言,确定配合比是须首要解决的问题,许多学者对此进行了积极探索^[5-8]。大多数研究中使用的试验设计方法偏向于单因素多层次试验研究或简单的多因素组合试验设计方法。当选取多个试验因素作为自变量时,试验次数呈指数级增长,因此,详细的试验优化既耗时又耗资源。近年来,随着土木工程材料的可持续发展,地聚合物注浆材料的统计试验设计越来越受到重视,响应面法(response surface methodology, RSM)目前已经在道路材料等工业制备优化领域中得到了广泛应用^[9]。传统的正交试验设计是一种用线性数学模型进行设计的方法,可以找出多个因素水平的最佳组合,但其只能分析离散型数据,会有精度不高,预测性不佳的缺点。而RSM则采用非线性模型,能求得高精度的回归方程,进行合理预测,找出最优工艺条件,并且RSM还可以直观展示各因子的交互作用,其结果准确性也更合理^[9]。ZHANG等^[10]通过RSM分析和评估了3个因素(矿渣含量、 Na_2O 含量和水胶比)及其相互作用对粉煤灰地聚合物注浆材料4个主要性能(流动性、7 d干缩比、7 d抗压强度和28 d抗压强度)的影响,并且根据RSM拟合程序确定最佳条件: Na_2O 含量、矿渣含量和水胶比的建议比值分别为5%、40%和45%。TIAN等^[9]也通过RSM预测和优化影响道路地质聚合物注浆材料初始流动性和机械强度的变量,结果表明:预测和验证的最优配比与试验结果仅相差约5%。

综上所述,当前将地聚合物用于注浆方面的研究方兴未艾。本研究通过回收利用粉煤灰等工业废渣,制备粉煤灰基地聚合物注浆材料(fly ash geopolymer grouting material, FGGM),为优化浆体性能提出一种RSM分析方法,对影响FGGM流动性和强度的变量进行预测和优化,运用Design Expert 8.0软件创建以流动性和28 d

抗压强度为响应面的模型,对试验结果进行方差分析和多目标配合比优化,为FGGM进行系统配合比设计和优化提供一定参考,并为其符合工程要求的准备工作提供理论支持。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

本研究采用的F类II级粉煤灰和S95级矿渣,均来自山西省灵寿县展腾产品加工厂,其主要化学成分见表1。碱激发剂为氢氧化钠固体(片状,纯度 $\geq 96.0\%$,由江苏思妍生物科技有限公司生产)和硅酸钠溶液($w(\text{SiO}_2) = 26.0\%$, $w(\text{Na}_2\text{O}) = 8.2\%$, $w(\text{H}_2\text{O}) = 65.8\%$),由长沙升阳化工材料有限公司生产)的混合溶液。使用时,先根据碱激发剂所需模数和浓度,称取定量的NaOH与水玻璃溶液,然后将NaOH溶于水玻璃溶液中,混合制成所需规格的激发剂,最后密封,陈化24 h备用。

表1 粉煤灰、矿渣的主要化学成分

Table 1 The main chemical components of fly ash and slag

	%						
材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{LOI})$
粉煤灰	56.80	31.90	1.02	2.80	0.65	0.48	4.80
矿渣	36.50	14.30	3.20	33.60	7.50	0.80	0.46

1.2 试验方法

流动性参照《公路路基与基层地聚合物注浆加固技术规程》(SZ-G-B04—2007),试验工具为锥形漏斗:上口口径 $\varnothing 70\text{ mm}$,下口径 $\varnothing 10\text{ mm}$,高度450 mm;计时工具为电子秒表,精度为0.1 s;抗压强度参照《水泥胶砂强度试验方法(ISO法)》(GB17671—1999),试验采用浙江晨信机械设备有限公司生产的YAW-300D微机控制压力试验机,试件尺寸大小为40 mm \times 40 mm \times 160 mm的长方体试件,每组3个试件,取其平均值作为结果。

2 响应面试验设计

本研究采用Design Expert 8.0软件进行试验设计。查阅文献^[11]与初步研究结果,结合注浆性能需求,将水玻璃的模数调至1.2,选取矿渣含量A、水玻璃浓度B和水胶比C作为影响因素,将FGGM流

动性、28 d抗压强度设置为响应值,以+1、0、-1编码代表不同的参数水平,具体方案见表2。采用标准多项式回归法拟合试验数据,二次多项式为:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_{ij} + \sum b_{ij} x_i^2 \quad (1)$$

式中: y 为响应值; b 为回归系数; x 为自变量。

表2 响应面试验因素和编码水平

Table 2 Response surface test factors and coding level

试验因素	编码水平		
	-1	0	1
$A/\%$	10	20	30
$B/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.0	1.3	1.6
C	0.48	0.54	0.60

3 响应面试验结果与分析

3.1 试验结果

对RSM设计的配合比进行流动性测试和28 d抗压强度测试,结果见表3。

3.2 方差分析及显著性检验

3.2.1 方差分析的评价指标

在进行数据拟合后,发现该模型有时不能很好地描述所研究的试验结果。更可靠的评估拟合模型质量方法是方差分析法(analysis of variance, ANOVA)。ANOVA常用于验证拟合模型的预测能力,判定数学模型和实际响应行为是否充分近似。用于回归模型评估和验证的ANOVA表达式及其运算公式见表4^[12-13]。

$S_{S_{\text{Mod}}}/S_{S_{\text{Tot}}}$ 表示解释变异的比例,也被称为决定系数 R^2 。一般来说,预测模型的整体精度通常由决定系数 R^2 来描述。 R^2 越接近1,模型拟合得越好。 R^2 的表达式为:

$$R^2 = \frac{S_{S_{\text{Mod}}}}{S_{S_{\text{Tot}}}} = 1 - \frac{S_{S_{\text{Res}}}}{S_{S_{\text{Tot}}}} \quad (2)$$

虽然 R^2 是衡量模型拟合数据的接近程度,但是它不能用来判断模型失拟,因为它没有考虑模型的自由度。因此,引入调整后的决定系数 R^2_{adj} ,挑战所比较模型中不同数量的自由度,其表达式为:

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \left(\frac{k - 1}{k - p} \right) \frac{S_{S_{\text{Res}}}}{S_{S_{\text{Tot}}}} \quad (3)$$

R^2_{adj} 随着模型中统计的不显著变量的增加而减少。因此,预测值和实际值之间会存在一定差异,差值被定义为残差,残差在评估模型精度方面起着至关重要的作用。

表3 响应面试验结果

Table 3 Response surface test results

编号	$A/\%$	$B/(\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	C	流动性/s	28 d抗压强度/MPa
1	30	1.6	0.54	20.5	31.5
2	20	1.6	0.48	44.2	29.4
3	10	1.6	0.54	20.3	17.2
4	20	1.6	0.60	14.7	28.2
5	30	1.3	0.60	12.2	32.7
6	10	1.3	0.48	45.3	21.3
7	20	1.3	0.54	18.3	29.7
8	20	1.3	0.54	17.3	29.1
9	20	1.3	0.54	17.6	31.1
10	20	1.3	0.54	18.1	30.1
11	30	1.3	0.48	44.4	35.9
12	20	1.3	0.54	21.3	28.4
13	10	1.3	0.60	13.6	17.3
14	20	1.0	0.60	17.6	26.3
15	20	1.0	0.48	48.3	31.9
16	10	1.0	0.54	26.7	18.3
17	30	1.0	0.54	31.5	29.3

表4 用于拟合参数线性模型的方差分析表

Table 4 Anova tables for fitting parametric linear models

变异来源	自由度	方差	均方差	<i>F</i>
模型(Mod)	<i>p</i> -1	$S_{S_{Mod}} = S_{S_{Tot}} - S_{S_{Res}}$	$M_{S_{Mod}} = S_{S_{Mod}}/(p-1)$	$M_{S_{Mod}}/M_{S_{Res}}$
残差(Res)	<i>k</i> - <i>p</i>	$S_{S_{Res}} = \sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2$	$M_{S_{Res}} = S_{S_{Res}}/(k-p)$	
失拟项(Lof)	<i>m</i> - <i>p</i>	$S_{S_{Lof}} = S_{S_{Res}} - S_{S_{Pe}}$	$M_{S_{Lof}} = S_{S_{Lof}}/(m-p)$	$M_{S_{Lof}}/M_{S_{Pe}}$
纯误差(Pe)	<i>k</i> - <i>m</i>	$S_{S_{Pe}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$M_{S_{Pe}} = S_{S_{Pe}}/(k-m)$	
总修正(Tot)	<i>k</i> -1	$S_{S_{Tot}} = \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2$		

注: S_S 为方差, M_S 为均方差, k 为集合中的试验总数; m 为不同水平的因子组合数; k_i 为第*i*个水平的重复次数; p 为模型中参数的总数。

预测决定系数 R^2_{pre} 是用于衡量模型预测能力的统计量,其表达式为:

$$R^2_{pre} = 1 - \frac{S_{S_{Res}}}{S_{S_{Tot}}} \tag{4}$$

R^2_{adj} 与 R^2_{pre} 的差值只有在0.2以内时,模型才有意义。

3.2.2 回归模型的方差分析

利用Design Expert 8.0软件对表3中的3个因素及其对应的响应值进行多元回归分析,得到流动性(Y_1)、28 d抗压强度(Y_2)的二阶多项式模型回归方程,其表达式分别为:

$$Y_1 = 18.52 + 0.34A - 3.05B - 15.51C - 1.15AB - 0.12AC + 0.30BC + 1.95A^2 + 4.28B^2 + 8.4C^2 \tag{5}$$
$$Y_2 = 29.68 + 6.91A + 0.063B - 1.75C + 0.82AB + 0.20AC + 1.10BC - 3.88A^2 - 1.73B^2 + 1.00C^2 \tag{6}$$

ANOVA结果见表5~6,其中, P_{Valve} 为误差概率的值。在方差分析过程中,决定系数 R^2 表征模型相关性,其值越接近1,模型拟合得越好;校正决定系数 R^2_{adj} 和预测决定系数 R^2_{pre} 的值越高,且两者差值小于0.2,模型预测性越好;变异系数 C_V 是反映变异程度的指标,变异系数小于10%,试验才可靠;精密度也称信噪比,反映的是模型抗干扰的能力,一般该值大于4模型才合理^[14]。FGGM流动性和28 d抗压强度的方差分析见表5~6。流动性回归模型的 $R^2=0.986\ 9$, $R^2_{adj}=0.970\ 1$, $R^2_{pre}=0.851\ 0$,变异系数 C_V 为8.44%,精密度为22.576;28 d抗压强度回归模型的 $R^2=0.985\ 5$, $R^2_{adj}=0.966\ 8$, $R^2_{pre}=0.887\ 1$, $C_V=3.71\%$,精密度为24.066。由此可以看出,模型的各项指标均符合要求,模型拟合程度较高,可采用该模型分析和预测FGGM的流动性及28 d抗压强度随参数变化的情况。

表5 流动性的方差分析与误差统计

Table 5 Variance analysis and error statistics of fluidity

方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	P_{Valve}
模型	2 427.370	9	269.710	58.670	<0.000 1
<i>A</i>	0.910	1	0.910	0.200	0.669 6
<i>B</i>	74.420	1	74.420	16.190	0.005 0
<i>C</i>	1 925.100	1	1 925.100	418.750	<0.000 1
<i>AB</i>	5.290	1	5.290	1.150	0.319 0
<i>AC</i>	0.063	1	0.063	0.014	0.910 5
<i>BC</i>	0.360	1	0.360	0.078	0.787 7
<i>A</i> ²	16.050	1	16.050	3.490	0.103 9
<i>B</i> ²	77.040	1	77.040	16.760	0.004 6
<i>C</i> ²	297.270	1	297.270	64.660	<0.000 1
残差	32.180	7	4.600		
失拟项	21.890	3	7.300	2.840	0.169 8
纯误差	10.290	4	2.570		
总修正	2 459.550	16			

表6 28 d抗压强度的方差分析与误差统计

Table 6 Analysis of variance and error statistics of 28 d compressive strength

方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	P_{Valve}
模型	495.570	9	55.060	52.72	<0.000 1
<i>A</i>	382.260	1	382.260	366.03	<0.000 1
<i>B</i>	0.031	1	0.031	0.03	0.867 6
<i>C</i>	24.500	1	24.500	23.46	0.001 9
<i>AB</i>	2.720	1	2.720	2.61	0.150 4
<i>AC</i>	0.160	1	0.160	0.15	0.707 1
<i>BC</i>	4.840	1	4.840	4.63	0.068 3
<i>A</i> ²	63.310	1	63.310	60.62	0.000 1
<i>B</i> ²	12.570	1	12.570	12.03	0.010 4
<i>C</i> ²	4.190	1	4.190	4.01	0.085 3
残差	7.310	7	1.040		
失拟项	3.140	3	1.050	1.01	0.477 1
纯误差	4.170	4	1.040		
总修正	502.880	16			

若 $P < 0.050$,即置信水平在95%以上,则表明响应值 Y_i 与回归方程存在显著性关系^[15]。由表5~6可知,FGGM的流动性和28 d抗压强度响应面回归模型均已达到高度显著水平。失拟项是试验数据与模型不相符情况的反映,其值越不显著,模型拟合程度越好。在表5中,流动性的失拟项和表6中28 d抗压强度的失拟项均不显著,表明两者模型拟合程度好,试验设计合理^[15]。对于每个影响因素来说,对应的 F 越大、 P 越小,该回归系数越重要。当 $P < 0.050$ 时,对应项对响应值 Y_i 的影响显著;当 $P < 0.001$ 时,对应项对响应值 Y_i 的影响极显著;当 $P > 0.050$ 时,对应项对响应值 Y_i 的影响不显著。由表5~6可知:水胶比对流动性和28 d抗压强度的影响都是显著的;矿渣含量仅对28 d抗压强度的影响是极显著的,对流动性的影响不显著;水玻璃浓度对流动性的影响是显著的,对28 d抗压强度的影响不显著。因此,三因素对流动性影响程度的排序为:水胶比>水玻璃浓度>矿渣含量,对28 d抗压强度影响程度的排序为:矿渣含量>水胶比>水玻璃浓度。

3.3 各因素的交互作用

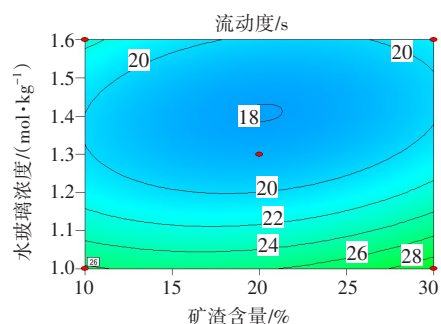
3.3.1 三因素对流动性的影响及交互作用

流动性是评价FGGM扩散性能的关键因素。当流动性控制在一定范围内时,FGGM可以顺利地注入路面板底的空隙中,达到高效率的填充或修补作用。等高线轮廓形状越接近椭圆形,各因素之间的交互作用越显著;轮廓形状越接近圆形,交互作用越不显著^[16-17]。从图1(a)可以看出,明显的等高线椭圆状表明水玻璃浓度和矿渣含量的交互作用显著。而在图1(b)和(c)中,水胶比和矿渣含量的交互作用,以及水胶比和水玻璃浓度的交互作用并不是很明显。可由表5的方差分析中可知: $P_{AB} < P_{BC} < P_{AC}$,这也证实了水玻璃浓度和矿渣含量的交互作用显著性强于其余两组的。

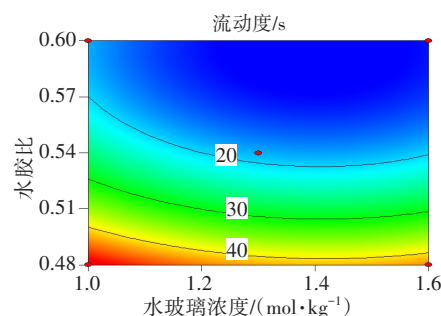
从图1(d)可以看出,当水胶比一定时,矿渣含量的增加对FGGM的流动性基本没有多大影响,而水玻璃浓度从1.0逐渐增至1.6时,FGGM流动性呈先增后降趋势。这是由于浓度较低的水玻璃溶液黏度较低,使得粉体间的摩擦减小,起到润滑作用;而过高浓度的水玻璃溶液会加速水玻璃中粉末颗粒与硅酸钠之间的反应,产生更多的水化硅酸钙凝

胶,且水玻璃浓度越高,其稠度越大,浆体之间的摩擦力也越大,使得流动性减少^[17-18]。从图1(f)可以看出,当矿渣含量一定时,流动性随水胶比的增加而增加,但当水胶比增加到0.57以上时,其对流动性的影响程度逐渐下降。

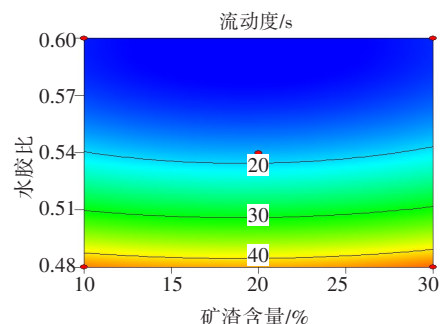
因此,当水玻璃浓度和水胶比分别为1.20~1.40和0.56~0.58时,FGGM的流动性最佳。



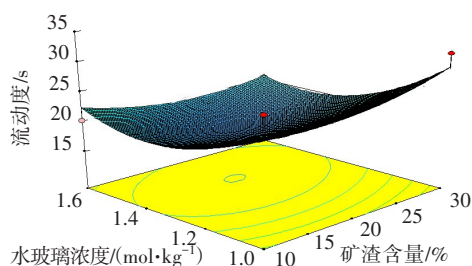
(a) 矿渣含量与水玻璃浓度



(b) 水玻璃浓度与水胶比



(c) 水胶比与矿渣含量



(d) 水玻璃浓度与矿渣含量

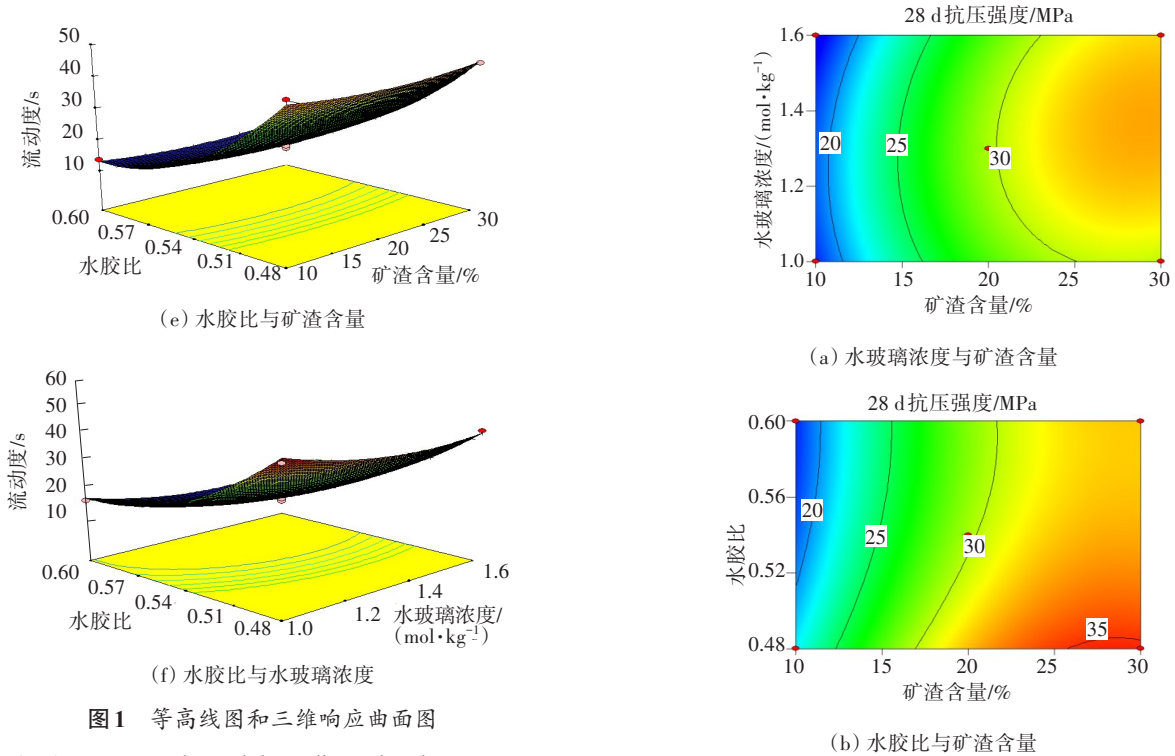


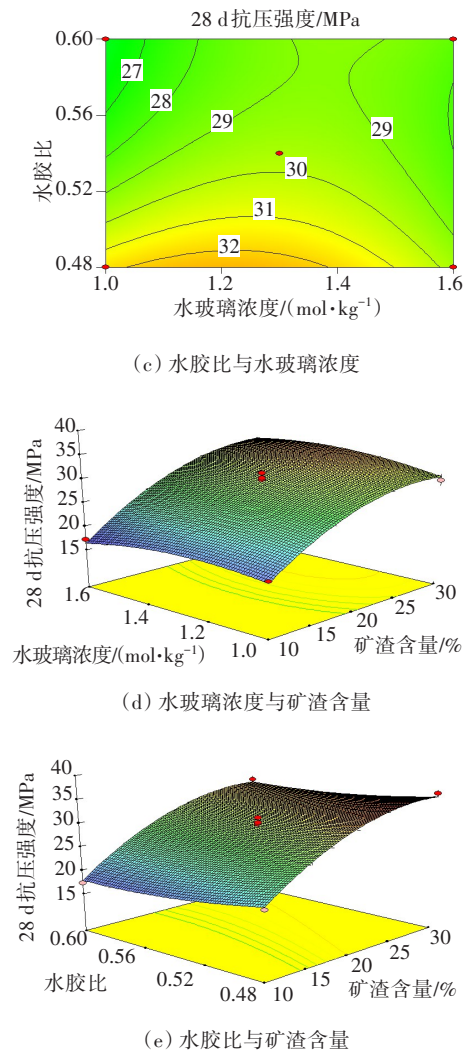
图1 等高线图和三维响应曲面图

Fig. 1 Contour plot and three-dimensional response surface plot

3.3.2 三因素对28 d抗压强度的影响及交互作用

FGGM作为一种新型的注浆材料,需要有一定的强度和黏结性能才能承受车辆的荷载。28 d抗压强度可以代表FGGM的极限抗压强度,反映其抗压强度。在RSM结果的基础上,考察影响因子及其间的相互作用对28 d抗压强度的影响,制作三维响应面和等高线图,如图2所示。从图2中无法看出各因素之间作用的显著性,但可以由表6方差分析中的 P 结果得出: $P_{BC} < P_{AB} < P_{AC}$,故水玻璃浓度和水胶比的交互作用显著性强于其余两组的。

从图2(d)和(e)中可以明显地看出,矿渣含量的增加,显著提高了FGGM的28 d抗压强度,证实了矿渣含量是影响FGGM强度的主要因素。因为 Ca^{2+} 可以使硅铝原料在解聚过程开始时生成多个缩合核,有助于加快反应,形成C—A—S—H(水化硅酸铝酸钙),同时也可以形成大量N—A—S—H(地聚合物凝胶),加速地聚合反应,提高FGGM的力学性能^[19]。当矿渣含量在20%~30%时,从图2中可以看出,强度增长趋势缓慢,说明矿渣含量在该分段含量之间强度差异不大。因此,考虑到性价比与经济效益,20%的矿渣更适合制备FGGM。



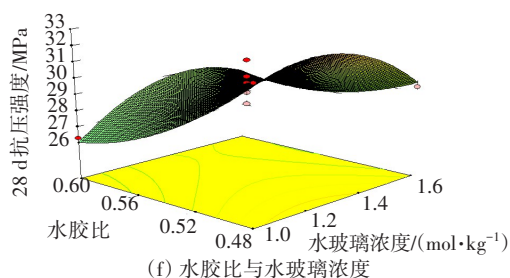


图2 等高线图和三维响应曲面图

Fig. 2 Contour plot and three-dimensional response surface plot

从图2(f)可以看出,当矿渣含量一定时,28 d抗压强度随着水胶比倒数的增大而增大。虽然其他研究证明了地聚合物28 d强度随水胶比的增大呈先增后减的趋势^[11],但此时的水胶比已经处于0.48以上,水胶比的增大会增加FGGM中多余的游离水,对后期强度产生负面影响,这与之前的结论并不冲突。从图2(f)中还可以看出,水玻璃浓度存在一个最佳值,这是因为水玻璃在地聚合反应中承担着两个作用^[20-21]:一是作为活化剂,溶液提供碱性环境,如果水玻璃浓度过低,则无法保证碱性条件;二是作为反应物,直接参与聚合反应,水玻璃浓度过高,会让更多的碱性离子对粉煤灰及矿渣组进行溶蚀和破坏。因此,其对FGGM强度的改善效果不大。

综上所述,当矿渣含量在20%以上,水玻璃浓度在1.20~1.40,水胶比在0.56~0.58时,FGGM的28 d抗压强度最佳。

3.4 最优分析结果试验验证

综合考虑流动性和28 d抗压强度两个响应值,基于RSM,使用Design Expert 8.0软件,获得最优条件。在RSM最优配比推荐下,矿渣含量、水玻璃浓度和水胶比取值分别为28.8%、1.37 mol/kg和0.56。为验证响应面法的有效性,按照优化后的配合比,制备出3组试件进行对比验证,每组试验重复3次,取平均值。预测值和测试值见表7。

表7 优化配合比强度的预测值与实际值

Fig. 7 The predicted and measured compressive strengths of the optimized mixture

响应值	流动性/s	28 d 抗压强度/MPa
预测值	16.0	32.6
测试值	17.3	30.9
相对误差/%	8.1	-5.2

由表7可知,流动性与28 d抗压强度的实际值与预测值的相对误差分别为8.1%和-5.2%,预测结果

与测试值的相对误差的绝对值小于10%,说明响应面模型能够真实地拟合测试情况。在最优配比条件下,同时也验证了FGGM的其他物理力学性能,测试结果和规格指标见表8。其中,相关指标参考《公路路基与基层地聚合物注浆加固技术规程》(SZ-G-B04—2007)。由表8可知,FGGM的各项性能指标基本满足规范要求。

表8 最优配比各方面性能

Fig. 8 Optimal ratio of all aspects of performance

相关性能	测试值	指标
流动性/s	17.3	<20
初凝时间/min	53	≥10
终凝时间/min	96	≤400
泌水率/%	0	≤0.40
膨胀率/%	0.04	≥0.01
1 d 抗压强度/MPa	11.9	≥5.0
7 d 抗压强度/MPa	21.4	≥20.0
28 d 抗压强度/MPa	30.9	≥30.0

4 结论

为研究矿渣含量、水玻璃浓度以及水胶比对FGGM的流动性和28 d抗压强度的影响规律,通过RSM设计试验,对FGGM的制备参数进行了综合分析,建立预测模型,得到三因素的优化值,并进行了试验验证,得到结论:

1) 随着矿渣含量的增加,FGGM的28 d抗压强度逐渐增加,流动性基本保持不变。随着水玻璃浓度从1.00 mol/kg逐渐增至1.60 mol/kg,FGGM流动性和28 d抗压强度均呈先增后降趋势,水玻璃浓度为1.20~1.40 mol/kg,两者能取到最优值。随着水胶比的增长,FGGM的流动性逐渐增大,但28 d抗压强度会缓慢下降。当水胶比为0.56~0.58时,FGGM的流动性最佳。

2) 通过方差分析,得出水胶比对FGGM流动性有极显著影响,三因素对流动性影响的强弱顺序为:水胶比>水玻璃浓度>矿渣含量。影响28 d抗压强度的主要因素是矿渣含量和水胶比,两者对28 d抗压强度均有显著影响,而水玻璃浓度对28 d抗压强度影响作用不显著。

3) 利用响应面分析得到最优配合比为:矿渣含量28.8%,水玻璃浓度1.37 mol/kg,水胶比0.56。FGGM的流动性与28 d抗压强度的实际值与预测值的相对误差分别为8.1%和-5.2%,两者的绝对值

均在10%以内,表明RSM能够有效优化配比,并具备较精准的预测能力。

参考文献(References):

- [1] 班游,蒋倩灵香,杨建军.水泥混凝土路面加铺沥青层结构应力分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 64-72.
BAN You, JIANG Qianlingxiang, YANG Jianjun. Stress analysis of asphalt layer on cement concrete pavement [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 64-72.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35 (2): 429-441.
- [3] 张书政,龚克成.地聚合物[J].材料科学与工程学报, 2003, 21(3): 430-436.
ZHANG Shuzheng, GONG Kecheng. Geopolymer [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21 (3): 430-436.
- [4] 张大旺,王栋民.地质聚合物混凝土研究现状[J].材料导报, 2018, 32(9): 1519-1527, 1540.
ZHANG Dawang, WANG Dongmin. Research status of geopolymer concrete [J]. Materials Review, 2018, 32 (9): 1519-1527, 1540.
- [5] WANG M H, WANG C H, YU J X, et al. Investigation of the grouting effect of blast furnace slag-based mortar on void road bases based on the grouting simulation test [J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122567.
- [6] ZHANG Z Q, TIAN Z N, ZHANG K W, et al. Preparation and characterization of the greener alkali-activated grouting materials based on multi-index optimization [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121328.
- [7] 田中男,张争奇,李乃强,等.工业废渣地聚合物注浆材料组分及性能增强的研究进展[J].材料导报, 2020, 34(19):19034-19042.
TIAN Zhongnan, ZHANG Zhengqi, LI Naiqiang, et al. Composition and performance enhancement of geopolymer grouting materials with industrial residue: A review [J]. Materials Reports, 2020, 34 (19) : 19034-19042.
- [8] 刘进琪,王世玉,彭晖,等.碱激发剂对粉煤灰基地聚合物性能影响研究[J].交通科学与工程, 2020, 36(3): 8-13.
LIU Jinqi, WANG Shiyu, PENG Hui, et al. Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 8-13.
- [9] TIAN Z N, ZHANG Z Q, ZHANG K W, et al. Statistical modeling and multi-objective optimization of road geopolymer grouting material via RSM and MOPSO [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121534.
- [10] ZHANG Y, WANG Y, WU Z G, et al. Optimal design of geopolymer grouting material for semi-flexible pavement based on response surface methodology [J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124779.
- [11] 韩汤益.粉煤灰基碱激发材料地聚合反应影响因素研究[D].长沙:长沙理工大学, 2016.
HAN Tangyi. Analysis of influencing factors on geopolymerization process of alkali-activated fly ash [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [12] ALMEIDA BEZERRA M, SANTELLI R E, OLIVEIRA E P, et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry [J]. Talanta, 2008, 76(5): 965-977.
- [13] LI Z P, LU D G, GAO X J. Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 36: 102101.
- [14] 张兰芳,刘丽娜,曹胜.响应面方法优化碱激发矿渣-石粉水泥砂浆的研究[J].材料导报, 2017, 31(24): 15-19.
ZHANG Lanfang, LIU Lina, CAO Sheng. Optimization of alkali activated slag-limestone powder mortar by response surface methodology [J]. Materials Review, 2017, 31(24): 15-19.
- [15] 朱祐增,刘浩,黄锐,等.基于响应面法的可控低强度材料配合比优化研究[J].硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2670-2679.
ZHU Youzeng, LIU Hao, HUANG Rui, et al. Optimization of mixture ratio research of controlled low strength materials based on response surface methodology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (8): 2670-2679.
- [16] 张丽娟,孟昕娜.正交设计和响应面设计在路用混凝土配合比优化中的应用与比较[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 119-126.
ZHANG Lijuan, MENG Xinna. Application and comparison of orthogonal and response surface design in mix proportion optimization of road concrete [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(3): 119-126.
- [17] 李莉,张赛,何强,等.响应面法在试验设计与优化中

(下转第45页)

- [11] 曾仲毅,徐帮树,胡世权,等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
ZENG Zhongyi, XU Bangshu, HU Shiquan, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880.
- [12] 丁金华,陈仁朋,童军,等. 基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 159-168.
DING Jinhua, CHEN Renpeng, TONG Jun, et al. Research on failure mechanism of shallow instability of expansive soil slope based on multifield coupling numerical analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 159-168.
- [13] 张良以. 基于多场耦合非饱和膨胀土边坡渐进破坏研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Liangyi. Study on progressive failure of unsaturated expansive soil slope based on multi-field coupling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 张良以,陈铁林,张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 70-77.
ZHANG Liangyi, CHEN Tielin, ZHANG Dingli. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77.
- [15] 陈亮胜,韦秉旭,廖欢,等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 132-140.
CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 132-140.
- [16] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
GU Weici. Handbook of earth pressure calculation of retaining wall [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2005.
- [17] 曾仲毅,徐帮树,胡世权,等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
ZENG Zhongyi, XU Bangshu, HU Shiquan, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880.
- [18] 浦敏艳,朱克生,王柳江. 降雨入渗作用下膨胀土挡土墙侧向土压力研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 125-128.
PU Minyan, ZHU Kesheng, WANG Liujiang. Research on lateral earth pressure from expansive soil acting on retaining wall under rain infiltration [J]. Yellow River, 2015, 37(11): 125-128.
- [19] ZARNANI S, BATHURST R J. Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table tests [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(5): 371-383.

(责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:李岳林)

(上接第17页)

- 的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [18] 殷素红,管海宇,胡捷,等. 碱激发粉煤灰-矿渣灌浆材料的流变性与流动性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 120-128, 135.
YIN Suhong, GUAN Haiyu, HU Jie, et al. Rheological properties and fluidity of alkali-activated fly ash-slag grouting material [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 120-128, 135.
- [19] 彭玉清,郭荣鑫,林志伟,等. 粉煤灰地聚物力学性能影响因素研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 858-866.
PENG Yuqing, GUO Rongxin, LIN Zhiwei, et al. Review on influencing factors of mechanical properties of fly ash geopolymer [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 858-866.
- [20] 杜天玲,刘英,于咏妍,等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚物强度的影响及激发机理[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 41-49.
DU Tianling, LIU Ying, YU Yongyan, et al. Influence of sodium silicate on fly ash slag geopolymer strength and stimulating mechanism [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 41-49.
- [21] 张光勇,刘建均,王海朋. 非开挖修补沥青路面半刚性基层地聚物材料研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(2): 21-26, 49.
ZHANG Guangyong, LIU Jianjun, WANG Haipeng. Study on geopolymer material for semi-rigid base of asphalt pavement repaired by trenchless method [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2022, 48(2): 21-26, 49.

(责任编辑:刘国奇;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)